

王亮, 吴舒畅, 杨华展, 等. 基于环境承载力的下沉式绿地污染物迁移数学解析模型[J]. 净水技术, 2023, 42(11): 149-158.

WANG L, WU S C, YANG H Z, et al. Mathematical analytic model of pollutant transportation in sunken greenbelt based on environmental carrying capacity[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 149-158.

基于环境承载力的下沉式绿地污染物迁移数学解析模型

王亮^{1,*}, 吴舒畅², 杨华展¹, 罗昊进³, 朱世俊⁴, 楼丹阳¹, 王和阳¹

(1. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江杭州 310028; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 311122; 3. 温州设计集团有限公司, 浙江温州 325000; 4. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江杭州 310014)

摘要 为高效评价下沉式绿地污染物净化效能以及对周边环境生态的影响, 系统建立了下沉式绿地雨水径流污染物一维迁移数学解析模型, 并给出污染物相对浓度变化以及累计通量去除率的数学解析表达式, 并用试验数据验证了模型的合理性和可靠性。基于模型计算结果, 分别得到了设定条件下 Pb^{2+} 污染物击穿曲线以及其累计通量去除率曲线。并发现蓄水高度从 5 cm 增长至 15 cm, 会使 Pb^{2+} 污染物累计通量去除率减少 35%, 污染物击穿时间从 110 h 缩短至 36 h。此外, 还揭示了污染物击穿时间和累计通量去除率随下沉式绿地土层渗透系数减小而增大的规律。基于解析模型, 给出了生态设计约束条件, 可有效避免初期雨水径流对植被及地下水土造成的污染。该数学解析模型的提出为海绵城市设计、城市水环境治理、地下水土污染控制等工程应用提供理论依据和技术指导。

关键词 下沉式绿地 海绵城市 污染物 径流 模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)11-0149-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.11.018

Mathematical Analytic Model of Pollutant Transportation in Sunken Greenbelt Based on Environmental Carrying Capacity

WANG Liang^{1,*}, WU Shuchang², YANG Huazhan¹, LUO Haojin³, ZHU Shijun⁴, LOU Danyang¹, WANG Heyang¹

(1. The Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China;

2. Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China;

3. Wenzhou Design Group Co., Ltd., Wenzhou 325000, China;

4. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract In order to effectively evaluate the purification efficiency of pollutants in sunken greenbelt and its impacts on the surrounding environment, one-dimensional mathematical analytical model for pollutant migration in rainwater runoff of sunken greenbelt was established systematically, and the mathematical analytical expressions for pollutant relative concentration change and cumulative flux removal rate were given. The rationality and reliability of the model were verified by experimental data. Based on the calculation results of the model, the breakthrough curve of Pb^{2+} and the cumulative flux removal rate curve were obtained under the set conditions. It was also found that the increase of water storage height from 5 cm to 15 cm reduced the cumulative flux removal efficiency of Pb^{2+} pollutants by 35%, and shorten the breakthrough time of pollutants from 110 h to 36 h. In addition, it also revealed that the breakthrough time and cumulative flux removal rate of pollutants increased with the decrease of the permeability coefficient of the sinking green soil layer. Based on the analytical model, the provided ecological design constraints can effectively avoid the pollution caused by the initial rainwater runoff to the vegetation, underground water and soil. The mathematical analysis model provides theoretical basis and technical guidance for sponge city design, urban water environment treatment, underground water and soil pollution control or other relevant

[收稿日期] 2022-12-02

[基金项目] 国家重点研发计划(2018YFC1802303); 污染控制与资源化研究国家重点实验室开放课题资助(PCRRF21027); 浙江省自然科学基金探索项目(LQ23E080020)

[通信作者] 王亮(1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为市政给排水管网优化设计、海绵城市设计及地下水土环境污染控制, E-mail: Leonwang0416@zju.edu.cn.

projects.

Keywords sunken greenbelt sponge city pollutant runoff model

近年来我国快速城镇化带来的城市不透水下垫面比例逐年升高,降雨径流污染愈发严重,北京市城区雨水径流污染占水体污染负荷 12%以上,上海市占 20%左右,因而进一步引发了城市水环境污染^[1-4]。党中央、国务院高度重视水环境治理问题,《“十四五”全国城市基础设施建设规划》强调,“积极推进海绵城市建设,以水而定,量水而行,构建城市健康水循环,形成与资源环境承载力相匹配的山水城理想空间格局”^[5]。

下沉式绿地作为国家海绵城市常见的低影响开发(LID)设施,用于道路源头减排时,主要功能为雨水径流污染控制,且须与自然水土、植被的环境承载力相适应^[6-8]。由于初期雨水径流污染性较强,自 2022 年起,国家强制性规范要求未经净化的初期雨水径流不得进入下沉式绿带^[9],但并未给出具体的数据要求。住房和城乡建设部 2022 年发文强调,“须深刻理解海绵城市建设理念,避免仅从单一专业角度出发考虑问题,应在分析城市生态本底承载力的基础上多专业协同,促进形成生态、安全、可持续的城市水循环系统”^[10]。

国外学者于 20 世纪末、21 世纪初对初期雨水径流长期集中入渗对地下水、植物生长的影响作了深入研究,并根据环境承载力要求对 LID 设施提出了具体的生态设计要求^[11-13]。Nieber 等^[14]发现雨水回收利用系统中的径流集中入渗会导致地下水中的金属和石油烃超标。Tedoldi 等^[15]通过对城市可持续排水系统(SUDS)系统土壤进行取样,分析发现 SUDS 系统具有良好的污染物控制能力,并通过数值模拟方法污染物迁移过程进行模拟,但对设计人员要求较高,须熟练掌握软件使用比需要大量实测数据进行率定。国内对下沉式绿地的研究大多集中于污染物负荷削减效果的试验研究^[16-18],而对地下水、植被环境的影响问题少有研究^[19]。刘畅等^[20]采用室外种植箱的方式进行模拟试验,研究不同植物配置、不同下垫面雨水径流、不同土壤厚度以及不同污染物浓度对下沉式绿地削减污染物的影响。邓若晨等^[21]指出雨水快速下渗过程中是否会对城市地下水造成负面影响值得探讨,并应建立适合工程设计人员使用的海绵城市污染物运移数学模

型,用以模拟地下水位溶质运移过程。李海燕等^[22]通过文献调研发现,国内目前对结合周边环境生态要求的污染物迁移数学解析模型的建立也仍处于起步阶段,这些都制约了下沉式绿地的合理应用。因此,建立一种简洁有效的数学解析模型来揭示雨水径流污染物在下沉式绿地的迁移规律,同时评价其对周边生态环境的影响势在必行。

基于上述研究基础,本文拟建立基于环境承载力的污染物迁移数学解析模型,技术路线如图 1 所示。通过耦合雨水径流下渗数学模型和污染物在地下水迁移数学模型^[23-24],系统性建立了下沉式绿地雨水径流污染物一维迁移数学解析模型。通过模型计算揭示雨水径流污染物在下沉式绿地内的迁移规律,并给出相对浓度变化及污染物累计通量去除率的解析表达式。同时,根据所处环境承载力要求提出生态设计约束条件,有利于海绵城市设计,也更有利于加强城市自然生境保护,提高自然生态系统活力,构建连续完整的城市生态基础设施体系。

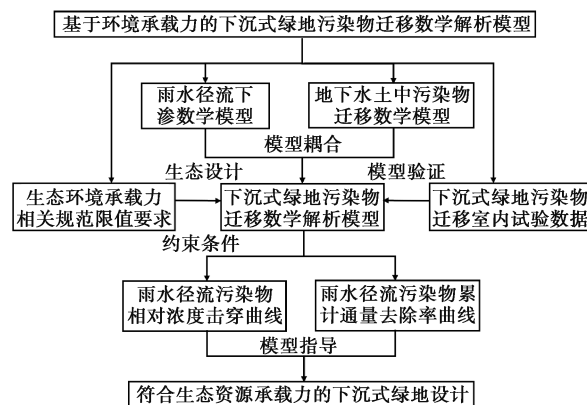


图 1 技术路线

Fig. 1 Technological Route

1 基本假设与数学模型

1.1 基本假设

如图 2 所示,在建立下沉式绿地雨水径流污染物迁移数学解析模型时,主要基于以下假设:(1)考虑雨水径流污染物在下沉式绿地均匀下渗,并服从达西定律;(2)下沉式绿地土层一般为 2 层,种植土层及中粗砂层,两土层之间考虑污染物浓度连续与通量连续;(3)污染物在地下水、土壤中主要迁移方式

为对流、扩散以及吸附作用；(4) 污染物在土中的扩散与对流是一维的；(5) 下边界考虑半无穷。

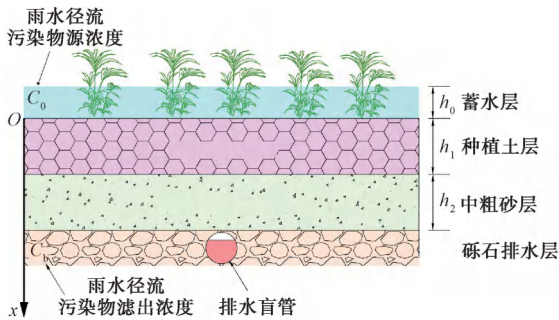


图2 下沉式绿地雨水污染物迁移^[25-26]

Fig. 2 Transportation of Rainwater Contaminant in Sunken Greenbelt^[25-26]

1.2 控制方程

目前应用较多的雨水下渗数学模型是基于达西定律所推导的,其表达式如式(1)。

$$v_a = \frac{Q}{A} = k_e \frac{h_0}{h_1 + h_2} \quad (1)$$

其中: v_a ——达西流速, m/s;

Q ——雨水下渗量, m^3/s ;

A ——下沉式绿地的面积, m^2 ;

k_e ——下沉式绿地各土层的垂直等效渗透系数, m/s;

h_0 ——蓄水层水位高度, m;

h_1, h_2 ——下沉式绿地种植土层、中粗砂层的厚度, m。

$$k_e = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2}} \quad (2)$$

其中: k_1, k_2 ——种植土层、中粗砂层的渗透系数, m/s。

基于上述假设,雨水径流污染物在下沉式绿地中的运移方程可描述如式(3)~式(4)^[27]。

$$R_1 \frac{\partial C_1(x,t)}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_1(x,t)}{\partial x^2} - v_1 \frac{\partial C_1(x,t)}{\partial x} \quad (3)$$

$$R_2 \frac{\partial C_2(x,t)}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 C_2(x,t)}{\partial x^2} - v_2 \frac{\partial C_2(x,t)}{\partial x} \quad (4)$$

其中: C_1, C_2 ——种植土层、中粗砂层的污染物质量浓度, mg/L;

D_1, D_2 ——种植土层、中粗砂层的扩散系数, m^2/s ;

v_1, v_2 ——种植土层、中粗砂层的渗流速度, m/s;

R_1, R_2 ——种植土层、中粗砂层的阻滞因子;

t ——时间, s;

x ——空间坐标, m。

式(3)、式(4)的初始条件如式(5)~式(6)。

$$C_1(x, 0) = 0 \quad (5)$$

$$C_2(x, 0) = 0 \quad (6)$$

相应的边界条件如式(7)~式(10)。

$$C_1(0^+, t) = C_0 \quad (7)$$

$$C_1(h_1^-, t) = C_2(h_1^+, t) \quad (8)$$

$$n_1 v_1 C_1(h_1^-, t) - n_1 D_1 \frac{\partial C_1(h_1^-, t)}{\partial x} =$$

$$n_2 v_2 C_2(h_1^+, t) - n_2 D_2 \frac{\partial C_2(h_1^+, t)}{\partial x} \quad (9)$$

$$C_2(\infty, t) = 0 \quad (10)$$

其中: n_1, n_2 ——种植土层、中粗砂层的孔隙率;

C_0 ——雨水径流污染物源质量浓度, mg/L。

1.3 数学模型的解

对流扩散方程在单层土质衬垫的情况下, Ogata等^[28]给出了其相对浓度的经典解析解。而本文数学解析模型中涉及两层土质衬垫, 两层土质衬垫的底部解析解较为复杂, 难以获得。因此, 通过结合前期研究成果所提出的污染物运移参数等效模型^[23], 可得到下沉式绿地的等效底部解析解, 相对浓度(C_N)表达式如式(11)~式(15)。

$$C_N = \frac{C_b}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{1-T_R}{2\sqrt{\frac{T_R}{P_L}}} \right) + \exp(P_L) \operatorname{erfc} \left(\frac{1+T_R}{2\sqrt{\frac{T_R}{P_L}}} \right) \right] \quad (11)$$

$$T_R = \frac{v_e t_b}{h_1 + h_2} \quad (12)$$

$$P_L = \frac{v_e (h_1 + h_2)}{D_e} \quad (13)$$

$$v_e = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1 R_1}{v_1} + \frac{h_2 R_2}{v_2}} \quad (14)$$

$$D_e = \frac{(h_1 + h_2)^2 \left(\frac{h_1 D_1 R_1^2}{v_1^3} + \frac{h_2 D_2 R_2^2}{v_2^3} \right)}{\left(\frac{h_1 R_1}{v_1} + \frac{h_2 R_2}{v_2} \right)^3} \quad (15)$$

其中: C_b ——下沉式绿地底部砾石排水层污染物击穿质量浓度, mg/L;

erfc——互补误差函数;

T_R ——时间因子;

P_L ——Pelect 数;

v_e, D_e ——种植土层、中粗砂层的等效渗透速度和等效扩散系数;

t_b ——指示性污染物击穿时间, s。

污染物瞬时通量 F_1 可由式(16)~式(19)求得^[29]。

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{D_e n_e C_0}{h_1 + h_2} \left[\frac{v_e (h_1 + h_2)}{D_e} (M_1 + M_2) + M_3 - P_L M_2 \right] \quad (16)$$

$$M_1 = \operatorname{erfc} \left(\frac{1 - T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}} \right) \quad (17)$$

$$M_2 = \exp(P_L) \operatorname{erfc} \left(\frac{1 + T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}} \right) \quad (18)$$

$$M_3 = \frac{2 \exp \left[- \left(\frac{1 - T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}} \right)^2 \right]}{\sqrt{\pi T_R/P_L}} \quad (19)$$

从而可以得到污染物累计通量 F_A 如式(20)~式(21)。

$$F_A = \int_0^{t_b} F_1 dt = \frac{1}{2} \frac{D_e n_e C_0 t_b}{h_1 + h_2} \left[P_L M_1 + M_3 + M_4 + \frac{2(1 - P_L) - M_2}{T_R} \right] \quad (20)$$

$$M_4 = \frac{P_L - 1}{T_R} \operatorname{erfc} \left(\frac{T_R - 1}{2\sqrt{T_R/P_L}} \right) \quad (21)$$

则污染物累计通量去除率 R_0 如式(22)。

$$R_0 = 1 - \frac{F_A}{v_a C_0 t_b} = 1 - \frac{1}{2} \frac{D_e}{v_e (h_1 + h_2)} \left[P_L M_1 + M_3 + M_4 + \frac{2(1 - P_L) - M_2}{T_R} \right] \quad (22)$$

2 模型验证

高天赐^[30]通过人工配水模拟道路径流,以土柱试验为手段,研究了下沉式绿地人工滤层对雨水中 Pb^{2+} 的截留规律。该试验采用有机玻璃柱,内部内径为 5 cm,长度为 60 cm,自上而下依次为蓄水层、种植土层、中粗砂层、砾石排水层。模拟试验期间保持上部淹水深度为 5 cm,模拟径流设计质量浓度恒定为 100 mg/L,模拟径流自上而下通过试验土柱,收集并记录砾石排水层的液体污染物浓度。通过调研文献^[23,27,31-32]及该试验实测数据^[30],具体模拟参数如表 1 所示。

表 1 试验土层参数取值

Tab. 1 Soil Layer Parameter Values for Experiment

土层	厚度 h/m	扩散系数 $D/(m^2 \cdot s^{-1})$	渗透系数 $k/(m \cdot s^{-1})$	孔隙度 n	阻滞因子 R
种植土层	0.20	3.5×10^{-8}	2.11×10^{-5}	0.24	38.0
中粗砂层	0.05	1.5×10^{-8}	1.40×10^{-5}	0.30	2.0

如图 3 所示,本文解析模型与试验数据拟合较好,决定系数 $R^2 = 0.994 1$,证实了本文下沉式绿地雨水污染物迁移数学解析模型的合理性与有效性,同时体现了在实际工程中拟合的实用性。

3 工程应用

全文强制性规范《园林绿化工程项目规范》(GB 55014—2021)^[9]中规定,未经净化处理的车行道初期径流雨水不得直接排入道路绿带。因初期雨水冲刷过车行道路面,水质较差,含有大量污染物,

不利于植物生长,同时也对地下水土造成不同程度的污染。

Pb 元素不是植物生长的必须元素和有益养分,浓度超过植物耐受程度对产生毒害作用,高浓度的 Pb 亦会严重阻碍植物的生理活动^[33]。因此,以重金属 Pb^{2+} 为例,其运移参数同表 1,通过本文数学解析模型计算以探究下沉式绿地不同蓄水高度、中粗砂层不同的渗透系数对污染物迁移的影响,以及未经净化雨水径流对植物和地下水土造成的污染程度。

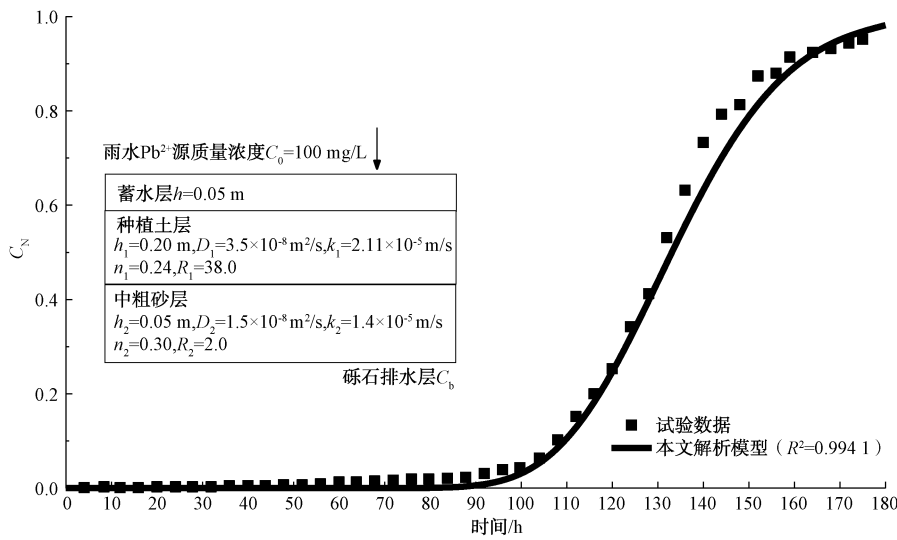


图3 解析模型与下沉式绿地雨水污染物 Pb²⁺ 试验数据对比

Fig. 3 Comparison between the Proposed Analytical Model and Pb²⁺ Test Data of Rainfall Runoff Contaminant in Sunken Greenbelt

3.1 不同蓄水高度对污染物迁移的影响

根据目前海绵城市建设情况,一般下沉式绿地蓄水高度常为 5~15 cm。据学者^[34-35]统计,国内普通道路雨水径流 Pb²⁺ 质量浓度为 0.05~0.07 mg/L。而根据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)的规定, Pb²⁺ 质量浓度 ≤ 0.005 mg/L (地下水 II 类标准), 取雨水径流 Pb²⁺ 质量浓度为 0.05 mg/L, 则 C_N 限值为 0.1。考虑到城市内短历时降雨一般为 120~180 min, 长历时降雨一般为 24~72 h, 下沉式

绿地排空时间宜为 24~48 h^[8,36], 如图 4 所示, 下沉式绿地相对浓度击穿时间随蓄水高度的增加而减少。对于城市短历时降雨 (120~180 min) 而言, 下沉式绿地能较好实现径流污染控制的功能, 同时满足《地下水质量标准》标准。但对于长历时 (24~72 h) 降雨而言, 蓄水高度 h₀ = 5 cm 时, 相对浓度击穿时间约为 110 h, 蓄水高度 h₀ = 10 cm 时, 相对浓度击穿时间约为 54 h, 这对于较为极端的 72 h 长历时降雨而言, 雨水径流污染物已有可能对植物及地下水土

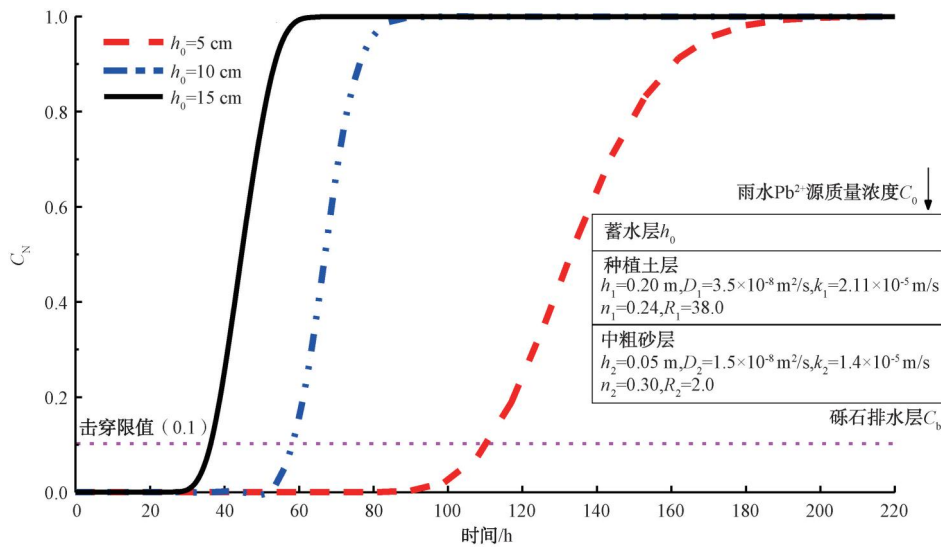


图4 不同蓄水高度 Pb²⁺ 相对浓度击穿曲线

Fig. 4 Relative Concentration Breakthrough Curve of Pb²⁺ at Different Water Storage Heights

造成污染。对于蓄水高度 $h_0 = 15$ cm 时, 相对浓度击穿时间约为 36 h, 较蓄水高度 $h_0 = 5$ cm 时约缩短了 67%, 在 60 h 时已污染物 Pb^{2+} 浓度已完全击穿, 在长历时降雨情况下, 会对植被及地下水土造成污染。

此外, 从污染物累计通量去除率角度分析, 如图 5 所示, 对于短历时降雨, 不同的蓄水高度的污染物累计通量去除率较高, 均能满足设计要求。对于长历时降雨, 蓄水高度 $h_0 = 5$ cm 的污染物累计通量去

除率接近 100%, 能较好实现源头减排阶段雨水径流污染控制的目标要求。对于长达 72 h 的长历时降雨, 蓄水高度 $h_0 = 10$ cm 的污染物累计通量去除率约为 90%; 蓄水高度 $h_0 = 15$ cm 的污染物累计通量去除率约为 65%。因此, 蓄水高度的增加会导致下沉式绿地污染物累计通量去除率下降, 蓄水高度分别从 5 cm 增大至 10 cm 和 15 cm, 依次使污染物累计通量去除率减少了 10% 及 35%。

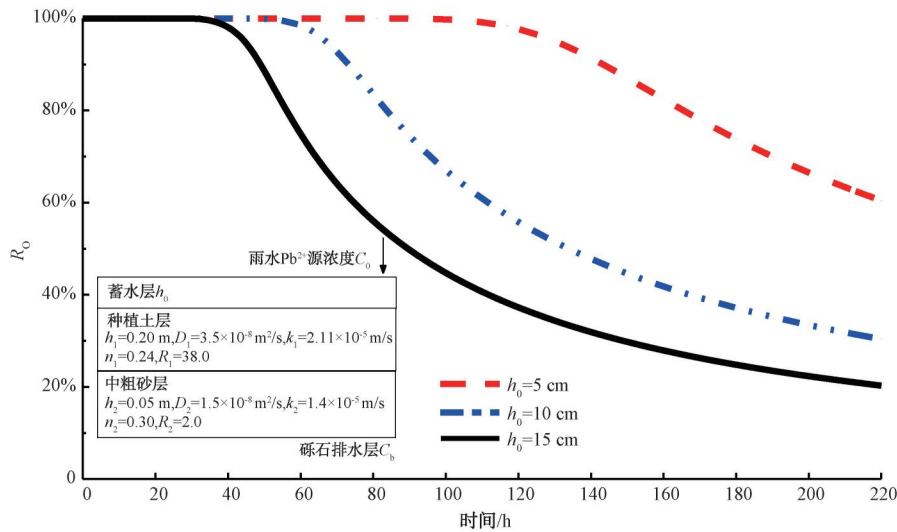


图 5 不同蓄水高度 Pb^{2+} 污染物累计通量去除率

Fig. 5 Cumulative Flux Removal Rate of Pb^{2+} at Different Storage Heights

结合园林规范对植物生长保护的要求^[9], 根据数学解析模型计算结果, 建议初期雨水径流须经净化后排入下沉式绿地, 同时应满足生态设计约束条件[式(23)], 即应通过数学模型计算保证在最不利降雨历时(或下沉式绿地最大排空时间, 两者取大值)的砾石排水层污染物浓度应不大于相关国家规范要求的限值。

$$\begin{cases} C_2(h_1 + h_2, t_b) \leq C_s \\ t_b = \max\{t_r, t_p\} \end{cases} \quad (23)$$

其中: C_s ——相关规范要求的限值, mg/L;

t_p ——下沉式绿地最大排空时间, s;

t_r ——最不利降雨历时, s。

3.2 土壤不同渗透系数对污染物迁移的影响

鉴于中粗砂具有较好承载力、透水性好, 而且可就地取材, 施工方便, 同时为保证调蓄能力, 换土层常采用中粗砂, 应用于海绵城市的中粗砂渗透系数常为 $2.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-6}$ m/s^[37-38]。

图 6 揭示了蓄水高度为 5 cm 时, 中粗砂层渗透系数越小, 相对浓度击穿时间越长。当中砂层渗透系数 $k_2 = 5 \times 10^{-6}$ m/s 时, 击穿时间为 160 h, 而渗透系数为 2×10^{-5} m/s 和 2×10^{-4} m/s 的相对浓度击穿时间依次是 104 h 和 84 h, 均满足长历时降雨情况下对植物及地下水土的生态设计要求。

如图 7 所示, 当蓄水高度为 10 cm 时, 以 72 h 为例, 渗透系数 $k_2 = 2 \times 10^{-4}$ 、 2×10^{-5} m/s 和 5×10^{-6} m/s 的污染物累计通量去除率依次为 70%、87% 和 99%。因此, 随着中粗砂层渗透系数的减小, 污染物累计通量去除率也随之增大。

此外, 根据前文分析, 若设计不满足生态设计约束条件式(23)要求, 可通过以下两种工程措施优化下沉式绿地设计: 1) 减少下沉式绿地蓄水空间高度, 具体设计时可选取各地海绵城市设计导则或图集的下限, 同时也减少淹水高度, 利于植物种类选取及生长, 使下沉式绿地更具有景观美感; 2) 减小中粗砂层的渗透系数, 以延长污染物浓度击穿时间, 增

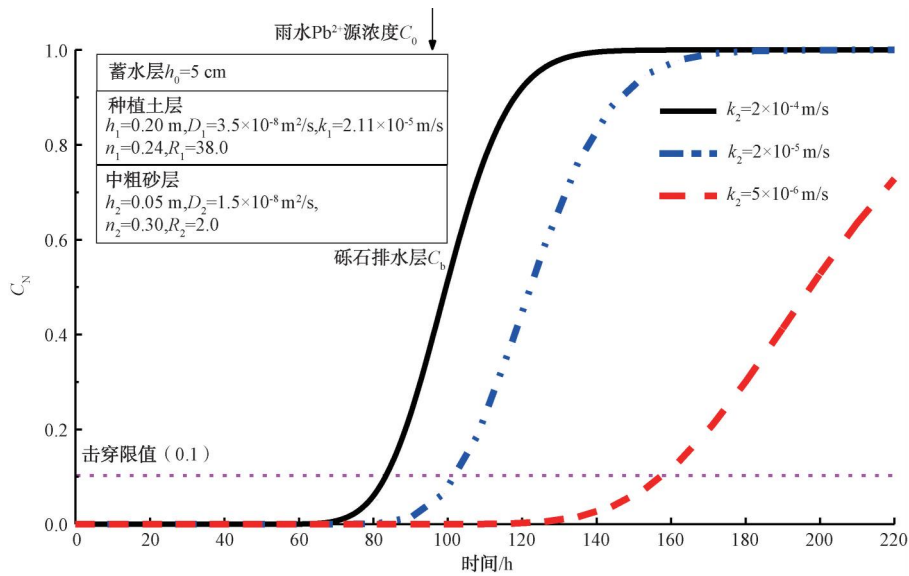


图6 中粗砂层不同渗透系数的 Pb²⁺ 相对浓度击穿曲线

Fig. 6 Relative Concentration Breakthrough Curves of Pb²⁺ for Medium-Sand Layer with Different Permeability Coefficients

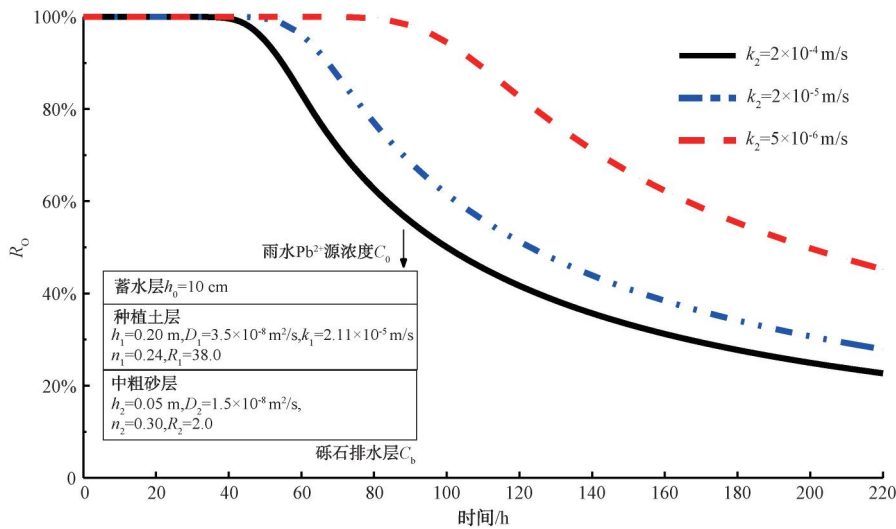


图7 中粗砂层不同渗透系数的 Pb²⁺ 污染物累计通量去除率

Fig. 7 Cumulative Flux Removal Rate of Pb²⁺ of Medium-Sand Layer with Different Permeability Coefficients

大污染物累计通量去除率,一般可通过换填,而当换填土渗透系数仍不满足生态设计约束条件时,可在下沉式绿地下敷设一层不透水材料,如钠基膨润土防水毯(GCL),以达到整体减少渗透系数的要求。

4 本研究模型局限及拓展研究方向

考虑到降雨历时中微生物降解的有限性,同时避免方程解过于复杂冗长,本研究模型主要考虑污染物在地下水土中对流、扩散以及吸附作用,而并未

考虑地下水土中微生物降解作用。因此,对于易被微生物短时间降解的污染物,模型计算结果可能偏于保守。进一步推导包含生物降解作用的下沉式绿地雨水径流污染物迁移数学模型可作为下一步研究方向,以期更完整地揭示迁移机理,以利生态环境评估以及海绵城市设计优化。

5 结论

基于经典的对流扩散方程,本研究系统构建了

下沉式绿地雨水径流污染物迁移的一维数学解析模型,并给出污染物相对浓度变化与污染物累计通量去除率的数学解析表达式。采用下沉式绿地污染物迁移的室内试验数据验证了本文数学模型的合理性与可靠性。

通过应用该数学解析模型,分别得到了下沉式绿地 Pb^{2+} 污染物击穿曲线以及污染物累计通量去除率曲线。并发现在设定条件下,下沉式绿地蓄水高度从 5 cm 增长至 15 cm,会使其污染物累计通量去除率减少 35%,污染物浓度击穿时间缩短 67%。模型还揭示了污染物击穿时间和累计通量去除率随下沉式绿地土层渗透系数减小而增大的规律。基于本文模型,给出了生态设计约束条件,避免下沉式绿地的设置对植被及地下水土造成污染。

本文所提出的数学解析模型可为海绵城市设计、城市水环境治理、黑臭水体治理、地下水土污染控制等工程提供理论依据和应用方案,尤其是在《“十四五”全国城市基础设施建设规划》印发后,蓝绿交织、灰绿融合、连续完整的城市生态基础设施系统建设越来越受到重视的今天有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 周飞祥,徐秋阳.既有市政道路海绵城市改造案例中若干关键问题探讨[J].中国给水排水,2022,38(12):100-106.
ZHOU F X, XU Q Y. Discussion on some key problems in a sponge city reconstruction case of existing municipal road[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(12): 100-106.
- [2] 周传庭,王梦玉,幸韵欣,等.城市初期雨水污染及处理措施的研究进展[J].净水技术,2022,41(7):17-26.
ZHOU C T, WANG M Y, XING Y X, et al. Research progress of urban initial stormwater pollution and treatment measure [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 17-26.
- [3] 王剑,黄向阳,程晓娜,等.基于SWMM的工业园区初期雨水截流调蓄池设计功效研究[J].市政技术,2022,40(10):158-164.
WANG J, HUANG X Y, CHENG X N, et al. Research on design efficacy of initial rainwater storage tank of industrial park based on SWMM [J]. Journal of municipal technology, 2022, 40(10): 158-164.
- [4] 皇甫子正,陈森,王振北,等.城镇径流污染控制技术路线构建与应用效果分析——以太湖流域城镇为例[J].给水排水,2022,58(3):54-61.
HUANGFU Z Z, CHEN M, WANG Z B, et al. The establishment and performance analysis of the rainfall runoff pollution elimination technical framework: Using located in Taihu Lake basin as examples [J]. Water & Wastewater, 2022, 58(3): 54-61.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.住房和城乡建设部国家发展改革委关于印发“十四五”全国城市基础设施建设规划的通知[EB/OL].(2022-07-29)[2022-08-23].
https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/zfhcxjsbjw/202207/20220729_767388.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Notice of the national development and reform commission of the ministry of Housing and Urban-Rural development on printing and distributing the 14th five-year plan for national urban infrastructure construction [EB/OL]. (2022-07-29) [2022-08-23]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/zfhcxjsbjw/202207/20220729_767388.html.
- [6] 欧阳友,潘兴瑶,张书函,等.典型海绵设施水循环过程综合试验场构建[J].中国给水排水,2022,38(2):132-138.
OUYANG Y, PAN X Y, ZHANG S H, et al. Construction of a comprehensive experimental field for the water cycle process of typical sponge facilities [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 132-138.
- [7] 郑妍妍,秦华鹏.低影响开发设施组合的水文模拟及不确定性分析[J].中国给水排水,2022,38(1):114-121.
ZHENG Y Y, QIN H P. Hydrological modeling of low impact development combined facilities and its uncertainty analysis [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 114-121.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城镇内涝防治技术规范:GB 51222—2017[S].北京:中国计划出版社,2017:15-16.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for urban flooding prevention and control: GB 51222—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017:15-16.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.园林绿化工程项目规范:GB 55014—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021:16-16.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Project code for landscape architecture engineering: GB 55014—2021 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2021: 16-16.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.住房和城乡建设部办公厅关于进一步明确海绵城市建设工作有关要求的通知[EB/OL].(2022-04-27)[2022-08-23].
https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/zfhcxjsbjw/202204/20220427_765918.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Circular of the General Office of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on further clarifying relevant requirements for sponge city construction [EB/

- OL]. (2022-04-27) [2022-08-23]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/zfhcxjsbjw/202204/20220427_765918.html.
- [11] BARRAUD S, GAUTIER A, BARDIN J P, et al. The impact of intentional stormwater infiltration on soil and groundwater [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(2): 185-192.
- [12] WEISS P T, LEFEVRE G, GULLIVER J S. Contamination of soil and groundwater due to stormwater infiltration practices: A literature review [EB/OL]. (2008-06-23) [2022-08-23]. <http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/115341/pr515.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. DOI: 10.1093/glycob/cws104.
- [13] 李怀恩, 贾斌凯, 成波, 等. 海绵城市雨水径流集中入渗对土壤和地下水影响研究进展 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(4): 589-600.
LI H E, JIA B K, CHENG B, et al. Research progress on the effect of concentrated runoff infiltration on soil and groundwater in sponge city [J]. *Advance in Water Science*, 2019, 30(4): 589-600.
- [14] NIEBER J L, ARIKA C, LAHTI L, et al. The impact of stormwater infiltration practices on groundwater quality [R]. St Anthony Falls Laboratory, 2014: 574-585.
- [15] TEDOLDI D, CHEBBO G, PIERLOT D, et al. Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of sustainable urban drainage systems: A literature review [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 904-926. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.215.
- [16] 张建云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 海绵城市建设有关问题讨论 [J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 793-799.
ZHANG J Y, WANG Y T, HU Q F, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China [J]. *Advance in Water Science*, 2016, 27(6): 793-799.
- [17] 郭超, 李家科, 李怀恩, 等. 雨水花园集中入渗对地下水水位和水质的影响 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36(12): 49-60.
GUO C, LI J K, LI H E, et al. Impacts of stormwater concentrated infiltration in rainwater gardens on groundwater level and quality [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(12): 49-60.
- [18] 贾忠华, 吴舒然, 唐双成, 等. 雨水花园集中入渗对地下水水位与水质的影响 [J]. *水科学进展*, 2018, 29(2): 221-229.
JIA Z H, WU S R, TANG S C, et al. Influences of focused recharge from rain gardens on groundwater level and water quality [J]. *Advance in Water Science*, 2018, 29(2): 221-229.
- [19] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践 [J]. *城市规划*, 2015, 39(6): 26-36.
YU K J, LI D H, YUAN H, et al. "Sponge city": Theory and practice [J]. *City Planning Review*, 2015, 39(6): 26-36.
- [20] 李畅, 王思思, FANG Xing, 等. 下沉式绿地对雨水径流污染物的削减效果及影响因素分析 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(11): 215-224.
LI C, WANG S S, FANG X, et al. Analysis on the reduction effect and influence factors of the sunken green space on stormwater runoff pollutant [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(11): 215-224.
- [21] 邓若晨, 孟侃, 姜媛, 等. 海绵城市建设对地下水影响研究综述 [J]. *城市地质*, 2020, 15(3): 312-319.
DENG R C, MENG K, JIANG Y, et al. Research progress on the groundwater impact from sponge city construction [J]. *Urban Geology*, 2020, 15(3): 312-319.
- [22] 李海燕, 魏鹏, 张悦. 生态雨水设施的污染物积累效应及风险研究进展 [J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(6): 90-95.
LI H Y, WEI P, ZHANG Y. Pollutant accumulation effect and risk to ecological rainwater facilities [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(6): 90-95.
- [23] 王亮, 谢海建, 吴家葳, 等. 填埋场成层衬垫污染物运移参数等效模型 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(3): 519-529.
WANG L, XIE H J, WU J W, et al. Equivalent model for pollutant transport parameters of layered landfill liners [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(3): 519-529.
- [24] 陈云敏, 谢海建, 柯瀚, 等. 层状土中污染物的一维扩散解析 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(4): 521-524.
CHEN Y M, XIE H J, KE H, et al. Analytical solution of contaminant diffusion through multi-layered soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(4): 521-524.
- [25] 华蓝设计(集团)有限公司. 海绵城市工程设计图集: 低影响开发雨水控制及利用 [M]. 南宁: 广西师范大学出版社, 2016: 41-41.
Hualan Design (Group) Co., Ltd. *Sponge city engineering design atlas: Rain water control and utilization for low impact development* [M]. Nanning: Guangxi Normal University Press, 2016: 41-41.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 38-42.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Technical guide for sponge city construction—Construction of rainwater system for low impact development (trial)* [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015: 38-42.
- [27] ROWE R K, QUIGLEY R M, BRACHMAN R W I. *Barrier systems for waste disposal facilities* [M]. London and New York: Spon Press, 2004: 115-118.
- [28] OGATA A, BANKS R B. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media [J]. USGS

- Professional Paper, 1961: 411. DOI: 10.4236/am.2013.411A1003.
- [29] SHACKELFORD C D. Transit-time design of earthen barriers [J]. *Engineering Geology*, 1990(29): 79-94.
- [30] 高天赐. 下凹式绿地人工滤层对初期雨水中重金属的截留试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- GAO T C. Experimental study on retention of heavy metals in early rainwater by artificial recessed greenbelt [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [31] WANG Y, CHEN Y, XIE H, et al. Lead adsorption and transport in loess-amended soil-bentonite cut-off wall [J]. *Engineering Geology*, 2016, 215: 69-80. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.11.002.
- [32] CARL L Y. Transport properties of chemicals and hydrocarbons: viscosity, thermal conductivity, and diffusivity of C1 to C100 organics and Ac to Zr inorganics [M]. Norwich: William Andrew Inc, 2009: 42-63.
- [33] 范拴喜. 土壤重金属污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 55-55.
- FAN S X. Soil heavy metal pollution and control [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011: 55-55.
- [34] 朱红生. 城市道路初期雨水截流与处理技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- ZHU H S. Research of intercepting and treatment technology for first flush rainwater from urban road [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [35] 张千千, 李向全, 王效科, 等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 352-358.
- ZHANG Q Q, LI X Q, WANG X K, et al. Research advance in the characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(2): 352-358.
- [36] 彭慧, 郭士红, 龚晶, 等. 极端暴雨条件下暴雨频率曲线模型及参数分析[J]. *水力发电*, 2021, 47(4): 24-28.
- PENG H, GUO S H, GONG J, et al. Research on frequency curves and parameters of extreme storm [J]. *Water Power*, 2021, 47(4): 24-28.
- [37] 吴建, 夏威夷, 顾兴宇, 等. 新型绿地填料对路面径流中重金属的去除效果试验研究[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(1): 63-68.
- WU J, XIA W Y, GU X Y, et al. Experimental study of removal effect of heavy metals in pavement runoff by a new greenbelt filter [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, 40(1): 63-68.
- [38] 齐俊修, 赵晓菊, 张中炎, 等. 中粗砂渗透、渗透变形参数统计分析研究[C]. 桂林: 2017年全国工程地质学术年会论文集, 2017.
- QI J X, ZHAO X J, ZHANG Z Y, et al. Statistical analysis and study on medium coarse sand permeability and permeability deformation parameters [C]. Guilin: Proceedings of the 2017 National Annual Conference on Engineering Geology, 2017.

(上接第90页)

- [17] 钟志成, 王德汉, 邓加曦. 以废磷酸为磷源的MAP法去除污泥压滤液中的氨氮[J]. *工业用水与废水*, 2016, 47(4): 29-32.
- ZHONG Z C, WANG D H, DENG J X. Removing $\text{NH}_3\text{-N}$ from sludge pressure filtration by MAP process with waste phosphoric acid as phosphorus source [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2016, 47(4): 29-32.
- [18] 丁剑楠, 韩秀茹, 林材, 等. 响应面法优化鸟粪石法去除粮食发酵废水中氮磷[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(5): 54-60.
- DING J N, HAN X R, LIN C, et al. Nitrogen and phosphorus removal from a food fermentation wastewater via magnesium-ammonium phosphate crystallization optimized with response surface analysis [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 41(5): 54-60.
- [19] 宋旭东. 鸟粪石沉淀法回收酸化油废水中的氮磷资源[J]. *广东化工*, 2022, 50(16): 138-141.
- SONG X D. Recovery of ammonium nitrogen and phosphorus from acidified oil wastewater by struvite precipitation [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 50(16): 138-141.
- [20] 张存款, 丁文川, 曾晓岚, 等. 优化电化学MAP法高效去除垃圾渗滤液中的氨氮[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(9): 25-32.
- ZHANG C K, DING W C, ZENG X L, et al. Optimized electrochemical magnesium ammonium phosphate method for efficient ammonia nitrogen removal from landfill leachate [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(9): 25-32.